

航空项目中 BOM 向 WBS 快速映射方法研究

Fast Mapping Method Between BOM and WBS of Aviation Project

西北工业大学自动化学院 于海夫 薛惠峰

[摘要] 针对航空型号项目的特点,建立了航空项目中 BOM 和 WBS 的数学模型,分别提取二者对后续项目均衡优化有较大影响的关键元素,分析关键元素之间的映射关系,并给出具体的映射法则。最后,以机翼装配为例验证本文提出方法的有效性。

关键词: 航空项目 物料清单(BOM) 工作结构分解(WBS) 映射

[ABSTRACT] Models of BOM and WBS are established considering the characteristics of aviation projects. The key elements in BOM and WBS, which affect the resources optimizing of the project, are selected to analyze the mapping relation between them. The rule of the mapping is also proposed in the paper. Finally, a case of wing assembly is presented to testify the effectiveness of the presented mapping rule.

Keywords: Aviation project Bill of materials(BOM) Work breakdown structure(WBS) Mapping

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.076

航空产品所包含的零部件数量庞大,任务之间的逻辑关系复杂,项目执行过程中涉及到的人员和部门众多,对航空项目的高效管理显得异常困难,因此合理的工作分解结构(WBS)成为了航空项目管理的关键所在^[1]。物料清单(BOM)在项目进行过程中有着极为重要的作用,BOM 不仅表明了产品的组件、子件、零件原材料之间的结构关系,而且也体现了每个装配件所需要的各个下属部件的数量。为了能够快速、合理地将 WBS 中的可交付单元描述得更为精细和易于管理,能够最大程度上满足航空项目的实际管理需求,有必要研究 BOM 与 WBS 之间的映射关系^[2]。

目前,针对项目管理过程中 BOM 和 WBS 的研究成果很多,汪洋等^[3]从物料项和物料项关系两方面构建了基于面向对象的统一 BOM 模型,并提出了面向对象的统一 BOM 模型的应用框架。戴晓^[4]针对多种类型的 BOM 展开应用研究,提出了面向明细报表的 BOM 模型和面向收费计算的 BOM 模型,并给出可配置 BOM 模型的设计方法,详细论述了产品配置的实现过

程。余晓华^[5]提出了一种基于 K-medoids 聚类算法的 GWBS 模型的构建方法,该方法通过对 GWBS 进行项目配置,可以快速生成符合客户定制需求的特定 WBS。皮亚风^[6]和聂亚军^[7]分别针对 WBS 在具体型号项目中的应用进行了探索与研究,并提出了 WBS 主要的定义、编制要求和主要框架。

航空型号项目的 BOM 与 WBS 虽然与一般的项目遵从共同法则,但也有其特有的形式,本文给出了航空型号中 BOM 与 WBS 的数学描述方法。考虑到项目资源问题,选取对项目资源均衡有较大影响的参数作为 BOM 与 WBS 的组成元素,进而研究二者之间的映射关系。由 BOM 向 WBS 映射进而建立起来的 WBS 能够更加准确地描述航空型号项目,且为后续资源均衡优化奠定了基础。

1 航空项目 BOM 数学模型的建立

在航空项目进行的过程中,面向产品生命周期的不同阶段和不同的生产部门存在多种形式的 BOM,主要包括:设计 BOM (Engineering BOM, EBOM)、工艺 BOM (Process planning BOM, PBOM)、制造 BOM (Manufacturing BOM, MBOM)、质量 BOM (Quality BOM, QBOM)、成本 BOM (Cost BOM, CBOM)、采购 BOM (Buying BOM, BBOM) 和销售 BOM (Sale BOM, SBOM) 等。通常来讲,对于航空型号项目来说,其研制过程中的核心 BOM 形式主要有 EBOM、PBOM 和 MBOM 3 种,其中 EBOM 是产品工程设计管理中使用的数据结构;PBOM 是工艺设计部门用来组织和管理生产某种产品及其相关零部件的工艺文件;MBOM 是在实际的制造和生产管理过程中生产某种所需的零部件物料清单。为了研究 BOM 与 WBS 之间的映射关系,有必要选择一种合适的 BOM 来建立数学模型。EBOM 出现的时间较早,但包含的必要信息不全面;MBOM 中的数据虽然更为细致丰富,但出现的时间相对较晚,对研究面向制造阶段的项目计划而言明显滞后;而 PBOM 既同时满足了 WBS 有关交付成果考核和体现工作流程的要求,又能够为其提供较为全面的基础数据,因此,它可作为工作分解的依据。

为了便于计算机数据存储与后续的网络优化计

算,本文用一个计算机语言中的结构体(Structure)对PBOM进行描述,结构体中的每个元素分别代表主要的零部件及装配关系、加工工序、所需时间和资源等。具体定义如下:

$$STRU_{PBOM}=\{A, N, C, X, T, R\},$$

其中, A 为零部件 a_{ij} 的集合; N 为零部件名称 n_{ij} 的集合; C 为零部件装配关系及装配数量 $c_{(i+1)k}^{ij}$ 的集合, 记 $c_{(i+1)k}^{ij} = (a_{ij}, a_{(i+1)k}, q)$, 表示 a_{ij} 与 $a_{(i+1)k}$ 之间存在装配关系, $a_{(i+1)k}$ 为 a_{ij} 的直接子件, 装配数量为 q ; X 为零部件工序 x_{ijl} 的集合, x_{ijl} 表示零部件 a_{ij} 的第 l 道工序; T 为工期 t_{ijl} 的集合, t_{ijl} 表示零部件 a_{ij} 的第 l 道工序所用时间, $t_{ij} = t(x_{ijl})$, a_{ij} 的制造总工期表示为 $t_{ij} = t(a_{ij}) = \sum_{l=1}^s t_{ijl}$, 其中 s 为零件 a_{ij} 的所有工艺划分的总数; R 为工序资源 r_{ijl} 的集合, r_{ijl} 表示零部件 a_{ij} 第 l 道工序所占用的资源。 $r_{ijl} = r(x_{ijl})$, a_{ij} 的第 l 道工艺划分的所需资源可表示为 $r_{ijl} = r(x_{ijl})$, a_{ij} 的制造总资源表示为 $r_{ij} = r(a_{ij})$ 。

2 航空项目 WBS 数学模型的建立

本文对 WBS 的描述主要是针对名称、编码、时间、资源和紧前紧后关系等,并未涉及 WBS 应包含的所有内容,所建立的快速映射方法是为研究项目网络计划的制定及其优化技术而服务的。因此, WBS 同 PBOM 一样,可以用一个结构体来进行描述,具体形式如下:

$$STRU_{WBS}=\{ID, N', C', X', T', R'\},$$

其中, ID 为 WBS 编码 id_{ij} 的集合。为了便于计算机识别,以下标 i 标识 WBS 单元在整个结构中的层次,以下标 j 标识其在本层中的位置,详细的层次结构关系仍由具体编码值来确定; N' 为 WBS 工作单元名称 n_{ij} 的集合; C'

表示 WBS 单元之间的上下级关系及紧前紧后关系,记 $c'_{ij} = (id_{(i-1)k}^{father}, id_{ij}, id_{ik}^{before}, id_{ik}^{after})$, 工作单元 $id_{(i-1)k}^{father}$ 和 id_{ij} 之间存在上下级关系,且 id_{ij} 为 $id_{(i-1)k}^{father}$ 的一个分支, id_{ik}^{before} 为 id_{ij} 的紧前工作单元, id_{ik}^{after} 为 id_{ij} 的紧后工作单元; T' 为工期 t_{ij} 的集合, t_{ij} 为工作单元 id_{ij} 的工期; R' 为资源 r_{ij} 的集合, r_{ij} 为工作单元 id_{ij} 所占用的资源。

3 BOM 与 WBS 之间的快速映射方法

研究航空项目的 BOM 与 WBS 之间的快速映射方法主要是为了对网络计划进行优化,并使瓶颈资源达到最佳的均衡状态,因此本文建立的快速映射方法主要针对项目进行过程中对生产进度产生制约的因素。BOM 中的一个或一组零部件与 WBS 中的一个工作单元之间可能存在若干种映射情况,但考虑到保持 WBS 中产品结构的完整性和 WBS 中一个工作单元不能有两个或两个以上父单元的限制,本文将所有映射方式均处理成一对一映射或一对多映射。

BOM 中的一个零部件单元可以记为 $PBOM(a_{ij}) = (a_{ij}, n_{ij}, c_{ij}, x_{ij}, t_{ij}, r_{ij})$, 零部件 a_{ij} 的某一个工序记为 $PBOM(x_{ijl}) = (a_{ij}, n_{ij}, c_{ij}, x_{ijl}, t_{ijl}, r_{ijl})$; WBS 中的一个工作单元记为 $WBS(d_{np}) = (id_{np}, n'_{np}, c'_{np}, t'_{np}, r'_{np})$, 则 BOM 中某一零部件的制造映射为 WBS 的一个工作单元可以表示为:

$$PBOM(a_{ij}) \rightarrow WBS(d_{np})|_{n=1}。$$

BOM 中某一零部件的一个或一组工艺划分映射为 WBS 的一个工作单元可以表示为:

$$PBOM(x_{ijl}) \rightarrow WBS(d_{np})|_{n=1}。$$

图 1 给出了某个零件制造过程的 BOM 到 WBS 的映射情况,其中父节点 p 与子节点中均包含了零部件

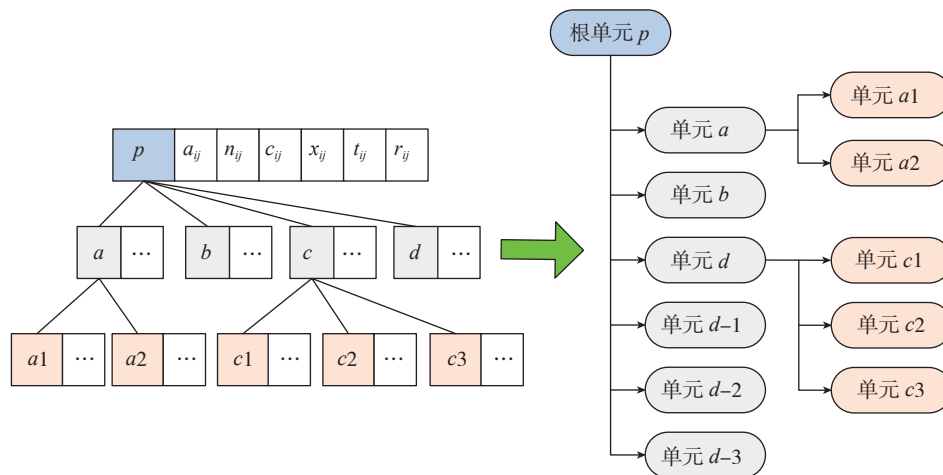


图 1 BOM到WBS的映射

Fig.1 Projection from BOM to WBS

集合、名称和装配关系等内容。零件 a 、 b 和 c 分别映射为 WBS 单元 a 、单元 b 和单元 c ，属于一对一映射；零件 d 映射为 WBS 单元 $d-1$ 、 $d-2$ 和 $d-3$ ，属于一对多映射。BOM 中零部件工艺划分与相应 WBS 的映射与零部件制造的映射相似。

在明确映射关系之后，就要开始研究具体的映射过程，根据 BOM 与 WBS 的数学模型可知，映射过程主要包括名称、紧前紧后关系、时间和资源的映射。

3.1 名称映射

BOM 中的零部件单元的名称无法直接作为 WBS 的工作单元名称使用，为了解决这一问题，在映射过程中分为两种情况，第一种情况是在装配关系单元 $c_{(i+1)k}^{ij} = (a_{ij}, a_{(i+1)k}, q)$ 中，若 $a_{(i+1)k}$ 为基本件，则其对应 WBS 单元 $WBS(d_{np})_{n=i+1}$ 的名称可用“[零件名称]+制造”表示。第二种情况是在装配关系单元 $c_{(i+1)k}^{ij} = (a_{ij}, a_{(i+1)k}, q)$ 中，若 a_{ij} 为装配件，则其对应 WBS 单元 $WBS(id_{np})_{n=i}$ 的名称可用“[零部件名称]+制造”表示，并在 $WBS(id_{np})_{n=i}$ 的下一级添加新单元 $WBS(id_{np'})_{n=i+1}$ ，名称表示为“[零部件名称]+装配”。另外，BOM 中的一道工序可以映射为 WBS 的一个工作单元，即若 x_{ijl} 为零件 a_{ij} 工艺路线中的一道工序，则对应 WBS 单元 $WBS(id_{np})_{n=i}$ 的名称可用“[零件名称]+工序名称”表示。

3.2 紧前紧后关系映射

根据 BOM 编制 WBS 时，需要定义严格的紧前紧后关系，进而为计划的编制奠定基础。在研究零件制造的 WBS 单元紧前紧后关系时，为了描述装配父子关系，首先引入装配顺序的定义，即在一个装配体中，其包含的子装配体和零件之间的装配顺序关系可用一个有序集合表示，记为：

$$AS(a_{(i-1)j}) = \{a_{i1}, a_{i1}, \dots, a_{ik}, \dots, a_{in}\},$$

其中， $a_{ik_1} > a_{ik_2}$ 且 $k_1 < k_2$ ，表示 a_{ik_1} 比 a_{ik_2} 优先进入装配。在此基础上，装配件的装配工作与其子件的制造工作之间的紧前紧后关系可以定义为：在装配序列 $AS(a_{(i-1)j}) = \{a_{i1}, a_{i1}, \dots, a_{ik}, \dots, a_{in}\}$ 中， $a_{(i-1)j}$ 为装配体，它对应的 WBS 单元为 $WBS(id_{(i-1)p'})$ ， $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ 为其下一级子装配体或零件，它们对应的 WBS 单元分别为 $WBS(id_{ip_1}), WBS(id_{ip_2}), \dots, WBS(id_{ip_n})$ ，按照名称映射中的规则， $WBS(id_{(i-1)p'})$ 的下一级新添单元为 $WBS(id_{ip_{n+1}})$ ，并确定 $WBS(id_{ip_1}), WBS(id_{ip_2}), \dots, WBS(id_{ip_n})$ 为 $WBS(id_{ip_{n+1}})$ 的紧前任务。

制造工序的 WBS 单元紧前紧后关系相对简单，可以定义为：设 x_{ijl_1} 与 x_{ijl_2} 为零件 a_{ij} 工艺路线 x_{ij} 中的前后相连的两道工序，且 x_{ijl_1} 先于 x_{ijl_2} ， x_{ijl_1} 与 x_{ijl_2} 对应的 WBS 单元分别为 $WBS(id_{ip_1})$ 、 $WBS(id_{ip_2})$ ，则 $WBS(id_{ip_1})$ 为 $WBS(id_{ip_2})$ 前

置任务， $WBS(id_{ip_2})$ 为 $WBS(id_{ip_1})$ 的后置任务。

3.3 时间映射

WBS 中的任务工期关系到项目进度计划的制定，一个精确的工期估算能够有效提高进度计划实施的顺利程度。利用 BOM 中的工时定额，由底向上估算任务的工期。 $PBOM(x_{ijl})$ 对应 WBS 单元 $WBS(id_{ip})$ ，则 $WBS(id_{ip})$ 的工期可确定为：

$$WBS(id_{ip})t_{ip} = PBOM(x_{ijl})t_{ijl}。$$

把映射分为零件和装配件两种情况对任务工期进行估算，定义规则为：在装配序列 $AS(a_{(i-1)j}) = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik}, \dots, a_{in}\}$ 中， $a_{(i-1)j}$ 为装配体，其对应的 WBS 单元为 $WBS(id_{(i-1)p'})$ ，假定 $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ 全部为没有子装配体的基本件（即零件），并且它们对应的 WBS 单元分别为 $WBS(id_{ip_1}), WBS(id_{ip_2}), \dots, WBS(id_{ip_n})$ ，另外，按照名称映射中的规则， $WBS(id_{(i-1)p'})$ 的下一级新添单元为 $WBS(id_{ip_{n+1}})$ ，则零件对应的 WBS 单元的工期可确定为：

$$WBS(id_{ik})t_{ik} = PBOM(a_{ik})t_{ik}, k \in \{p_1, p_2, \dots, p_n\}。$$

装配体 $a_{(i-1)j}$ 对应的装配工作单元 $WBS(id_{ip_{n+1}})$ 的工期确定为：

$$WBS(id_{ip_{n+1}})t_{ip_{n+1}} = \sum_{k=p_1}^{p_n} (PBOM(a_{ik})t_{ik})。$$

3.4 资源的映射

资源是决定项目成功的关键因素之一，资源需求量的估算是资源优化配置的基础，本文采用和时间估算相同的方法对其进行估计，即 $PBOM(x_{ijl})$ 对应 WBS 单元 $WBS(id_{np})$ ，则 $WBS(id_{np})$ 的工期可确定为：

$$WBS(id_{np})r_{np} = PBOM(x_{ijl})r_{ijl}。$$

在装配序列 $AS(a_{(i-1)j}) = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik}, \dots, a_{in}\}$ 中， $a_{(i-1)j}$ 为装配体，对应的 WBS 单元为 $WBS(id_{(i-1)p'})$ ，假定 $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ 全部为没有子装配体的基本件（即零件），并且它们对应的 WBS 单元分别为 $WBS(id_{ip_1}), WBS(id_{ip_2}), \dots, WBS(id_{ip_n})$ ，且 $WBS(id_{(i-1)p'})$ 的下一级新添单元为 $WBS(id_{ip_{n+1}})$ ，则零件对应的 WBS 单元的资源需求量可确定为：

$$WBS(id_{ik})r_{ik} = PBOM(a_{ik})r_{ik}, k \in \{p_1, p_2, \dots, p_n\}，$$

装配体 $id_{(i-1)j}$ 对应的装配工作单元 $WBS(id_{ip_{n+1}})$ 的资源需求量确定为：

$$WBS(id_{ip_{n+1}})r_{ip_{n+1}} = \sum_{k=p_1}^{p_n} (PBOM(a_{ik})r_{ik})，$$

名称为“ $[a_{(i-1)j}]$ 制造”的工作单元 $WBS(id_{(i-1)p'})$ 的资源需求量确定为：

$$WBS(id_{(i-1)p'})r_{(i-1)p'} = \sum_{k=p_1}^{p_{n+1}} (WBS(id_{ik})r_{ik})。$$

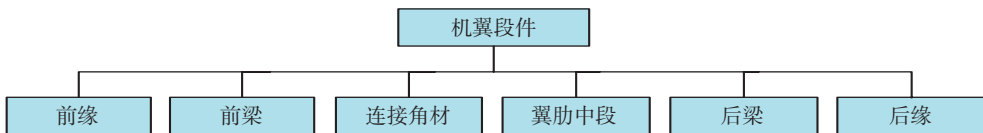


图2 机翼段件的BOM结构

Fig.2 BOM of structure of the wing section

表1 BOM与WBS之间的映射

BOM 结构						WBS 结构				
序号	名称	父件	工艺	时间	资源	序号	名称	紧前	时间	资源
1	s		s ₋₁	t(s)	r(s ₋₁)	1	s 装配	4,5,6,7,8, 11	t(s ₋₁)+t(s ₋₂)	r(s ₋₁)+r(s ₋₂)
			s ₋₂	t(s ₋₂)	r(s ₋₂)					
2	s ₁	1	s ₁₋₁	t(s ₁₋₁)	r(s ₁₋₁)	2	s ₁₋₁ 加工	—	t(s ₁₋₁)	r(s ₁₋₁)
			s ₁₋₂	t(s ₁₋₂)	r(s ₁₋₂)	3	s ₁₋₁ 加工	2	t(s ₁₋₂)	r(s ₁₋₂)
			s ₁₋₃	t(s ₁₋₃)	r(s ₁₋₃)	4	s ₁₋₁ 加工	3	t(s ₁₋₃)	r(s ₁₋₃)
3	s ₂	1	s ₂₋₁	t(s ₂₋₁)	r(s ₂₋₁)	5	s ₂ 制造	—	t(s ₂₋₁)+t(s ₂₋₂)	r(s ₂₋₁)+r(s ₂₋₂)
			s ₂₋₂	t(s ₂₋₂)	r(s ₂₋₂)					
4	s ₃	1	s ₃₋₁	t(s ₃₋₁)	r(s ₃₋₁)	6	s ₃ 制造	—	t(s ₃₋₁)+t(s ₃₋₂)	r(s ₃₋₁)+r(s ₃₋₂)
			s ₃₋₂	t(s ₃₋₂)	r(s ₃₋₂)					
5	s ₄	1	s ₄₋₁	t(s ₄₋₁)	r(s ₄₋₁)	7	s ₄ 制造	—	t(s ₄₋₁)+t(s ₄₋₂)	r(s ₄₋₁)+r(s ₄₋₂)
			s ₄₋₂	t(s ₄₋₂)	r(s ₄₋₂)					
6	s ₅	1	s ₅₋₁	t(s ₅₋₁)	r(s ₅₋₁)	8	s ₅ 制造	—	t(s ₅₋₁)+t(s ₅₋₂)	r(s ₅₋₁)+r(s ₅₋₂)
			s ₅₋₂	t(s ₅₋₂)	r(s ₅₋₂)					
7	s ₆	1	s ₆₋₁	t(s ₆₋₁)	r(s ₆₋₁)	9	s ₆₋₁ 加工	—	t(s ₆₋₁)	r(s ₆₋₁)
			s ₆₋₂	t(s ₆₋₂)	r(s ₆₋₂)	10	s ₆₋₁ 加工	9	t(s ₆₋₂)	r(s ₆₋₂)
			s ₆₋₃	t(s ₆₋₃)	r(s ₆₋₃)	11	s ₆₋₁ 加工	10	t(s ₆₋₃)	r(s ₆₋₃)

4 实例分析

本文以某型飞机中机翼段件的制造为例,对 BOM 到 WBS 的映射情况加以说明。机翼段件(s)由 6 种零部件装配而成,包括:前缘(s₁)、前梁(s₂)、连接角材(s₃)、翼肋中段(s₄)、后梁(s₅)和后缘(s₆),BOM 结构如图 2 所示。

按前述方法进行映射,可得到表 1 所示的 BOM 与 WBS 之间的对应关系。在 BOM 结构对应的 WBS 中,仍需补充一项工作,即“机翼段件制造”工作,且工作 1~11 均为其子单元。

5 结论

本文通过分析航空型号项目中不同阶段的 BOM,确定 PBOM 作为建立 BOM 模型和研究 BOM 与 WBS 映射关系的 BOM 类型。分别建立 BOM 与 WBS 的数学模型,详细分析了 BOM 中名称、紧前紧后关系、时间和资源与 WBS 的映射关系,给出了具体的映射方法。最后,以某

型飞机中机翼段件的制造为例,应用本文提出的方法实现了由 BOM 建立 WBS 的过程。

参考文献

- [1] 郭斌. 飞机型号项目工作分解结构编制方法探讨. 民用飞机设计与研究, 2012(S1):191-194.
- [2] 郭之超. 面向飞机装配的制造 BOM 研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [3] 汪洋, 江克勤, 韩承双. 基于面向对象的统一 BOM 模型研究. 机械工程师, 2008(6):122-124.
- [4] 戴晓. BOM 模型的研究与应用[D]. 南京: 南京工业大学, 2006.
- [5] 余晓华. 基于 K_medoids 的项目族工作分解结构模型构建及其配置研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [6] 皮亚风. 航天型号研制工作分解结构(WBS)编制研究. 华北航天工业学院学报, 2006(3):1-3, 8.
- [7] 聂亚军. 工作分解结构(WBS)在发动机型号研制中的应用. 航空发动机, 2007(1):51-54.

(责编 谷雨)